ChinaXiv合作期刊

西安市河流沉积物重金属分布特征及其与土地利用类型关系

胡长通[1]， 杨　涛[1,2]， 万旭昊[1]， 孙来康[1]， 郑奕文[1]， 严雪溶[1]

（1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710119；2. 陕西省污染物暴露与生态环境健康国际联合研究中心，陕西 西安 710062）

摘　要：为了解不同土地利用类型对河流沉积物重金属分布影响，以西安典型城市河流（灞河、浐河、沣河和黑河）为研究对象，采用潜在生态风险法（RI）、污染负荷指数法（PLI）、相关性分析与主成分分析等方法对河流沉积物重金属（Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd和As）的空间分布、环境风险以及来源进行分析和评价。结果表明：4条河流沉积物重金属含量大小为：浐河>灞河>黑河>沣河；相关性分析表明，河岸小范围内林地与草地对于重金属富集作用更强；RI结果表明，Cd对于污染贡献最大，4条河流均处于中等潜在生态风险；PLI结果表明，黑河H1样点受到污染程度最高，为中度污染；RI与PLI评价均表明，浐河样点受污染占比最大，且集中在人造地占比与人类活动强度较大的中下游；相关性分析与主成分分析表明，大部分重金属来源于工业与农业生产排放以及交通污染等人类活动。为防止污染进一步加深，应特别注意Cd污染的防治，特别是沣河中游与黑河中游。

关键词：城市河流；沉积物重金属；空间分布；土地利用类型；生态风险

重金属具有不可降解性、生物富集性、可持续性以及较高的毒性，其所带来的环境污染成为近年来人们关心的热点问题[1-2]。当环境中的重金属含量超过一定阈值，会对生物以及生态环境造成严重危害[3-6]。由于河流沉积物中的重金属含量远大于水体中的含量，所以当水体的pH、电导率、溶解氧等理化性质发生变化时，沉积物中的重金属可能会重新进入水体中，导致水体受到二次污染[7-9]。相关研究表明，沉积物中的重金属比水体中的重金属对底栖生物产生的不良影响更大[10-11]。当沉积物中的重金属通过食物链富集，可能会对人体健康产生致癌作用[12]。

土地利用类型对河流沉积物重金属有一定的影响，而不同的土地利用方式对河流沉积物重金属产生的影响有所不同[13]。研究结果表明，土地利用斑块的多样性与人类活动强度越高，河流沉积物受污染程度越重[14]。土地利用类型往往会伴随着人类活动而发生改变，城市区域人类活动较为复杂，其土地利用方式变化频繁且更为密集[15]。因此，城市河流受土地利用类型与人类活动的影响更大，其对人类产生的直接影响更强[16-18]。Zeng等[19]在研究上海市河流与土地利用类型关系中发现城市区域河流沉积物重金属浓度最高，而土地利用度较小的崇明岛河流沉积物重金属浓度较低。Viana等[20]研究发现，河流附近土地利用类型为森林、草地等自然用地，其沉积物重金属浓度显著低于流经城市、耕地等人为用地的河流。

目前，对于单一河流沉积物重金属研究较多，但是对于城市内相互连接的多条河流沉积物重金属与土地利用类型关系的研究较少[19]。西安是一个集科技、工业以及旅游业高度发达的城市，其城市河流更容易受到人类活动的污染[21]。因此，研究西安城市河流沉积物重金属与土地利用类型关系以及造成的环境风险对于城市发展和规划具有重要意义。本文以西安市境内4条典型城市河流灞河、浐河、黑河、沣河为研究对象，旨在研究：（1）西

收稿日期：2021-11-24；　**修订日期：**2022-02-26

基金项目：国家自然科学基金项目（41571512）；陕西省自然科学基金（2019JM-282）

作者简介：胡长通（1996-），男，硕士研究生，研究方向为流域生态健康评价. E-mail: hctong@snnu.edu.cn

通讯作者：杨涛. E-mail: tyang@snnu.edu.cn

chinaXiv:202209.00155v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202209.00155v1

安城市河流沉积物重金属空间分布特征与两岸土地类型以及人类活动强度的关系。(2) 评估西安城市河流沉积物重金属对环境造成的生态风险。(3) 探讨城市河流沉积物重金属的来源。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样

西安市(107°40′~109°49′E，33°39′~34°45′N)，属于暖温带半湿润大陆性季风气候。西安市面积约为10096.81 km²，其土地利用类型主要以建设用地、农用地以及林地为主，分别占全市土地面积13.96%、31.02%、47.61%。西安市水面面积为39.7 km²，其中水产养殖面积为11.71 km²[22]。西安城市河流主要由黄河最大的支流——渭河水系构成，主要包括灞河、黑河、沣河和浐河等河流，4条河流均发源于秦岭北麓[23]。其中，灞河与浐河流经市区，沣河与黑河则位于郊区；灞河位于西安市的东南部，全长109 km，流域面积为2581 km²；浐河全长64.6 km，流域面积760 km²[24]；黑河位于西安市周至县境内，全长125.8 km，流域面积2283 km²；沣河位于西安西南部，全长78 km，流域面积1460 km²[25]。

于2020年10—11月在西安市境内4条河流共设置了24个采样点(图1)，其中灞河采样点8个，浐河采样点8个，沣河采样点4个，黑河采样点4个。在每个采样点随机采取至少5个地点的0~5 cm表层沉积物，充分混合；将其储存在洁净的聚乙烯塑料袋中，并在4 ℃低温下保存运至实验室，在进行分析之前将样品储存在-20 ℃的环境中[26]。在采样的同时，调查了采样点周围的河岸带人类活动强度(河岸带人类活动强度指数 = 监测点100 m范围内存在大、中型机动车行驶、河岸带采砂及捕鱼的距离/100 m)[27]。根据自然资源部2020年发布的30 m全球地表覆盖数据(GlobeLand30 2020版)调查了4条河流两岸100~1500 m缓冲区范围内土地利用类型(http://www.globallandcover.com)；在研究区域共有耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表、裸地8种土地利用类型(图2)；其中人造地表是由人工建造活动形成的地表，包括城镇等各类居民地、工矿、交通设施等。

1.2 重金属前处理与分析

沉积物样品在自然条件下风干，并挑出样品中的杂物，使用粉碎机将其粉碎，并通过100目尼龙筛进行过滤。称取0.3 g沉积物样品置于消解罐中，加入浓酸混合物(1 mL H_2O_2-4 mL HNO_3-2 mL HCL-1

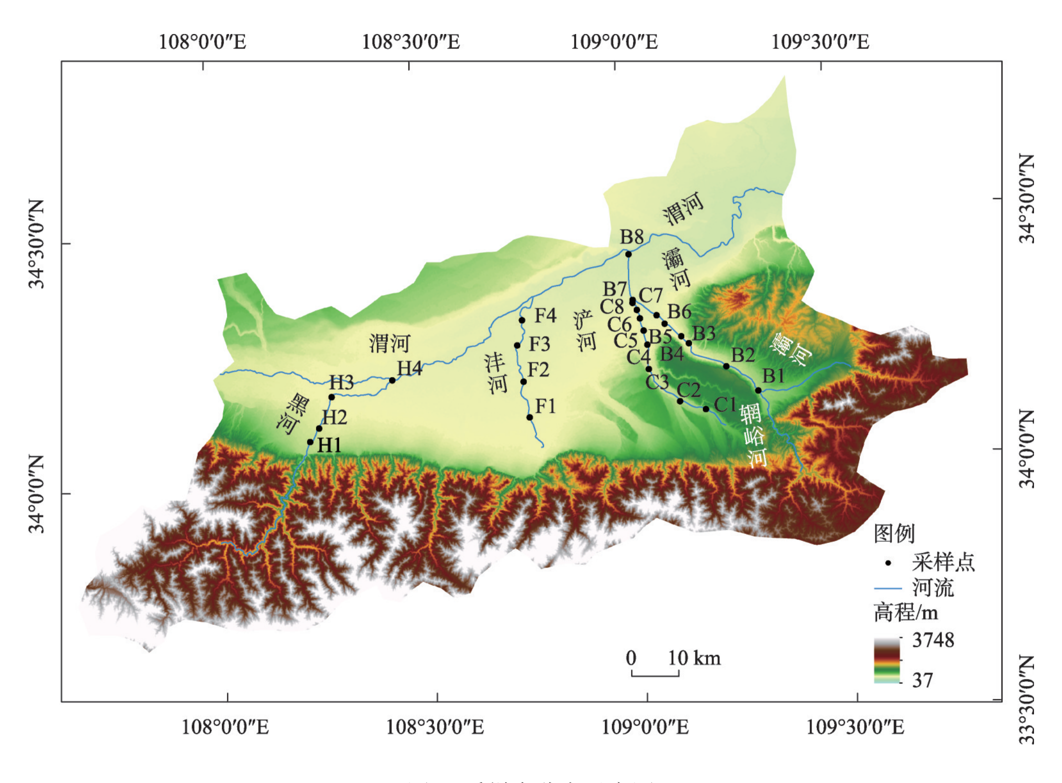


图1 采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling points

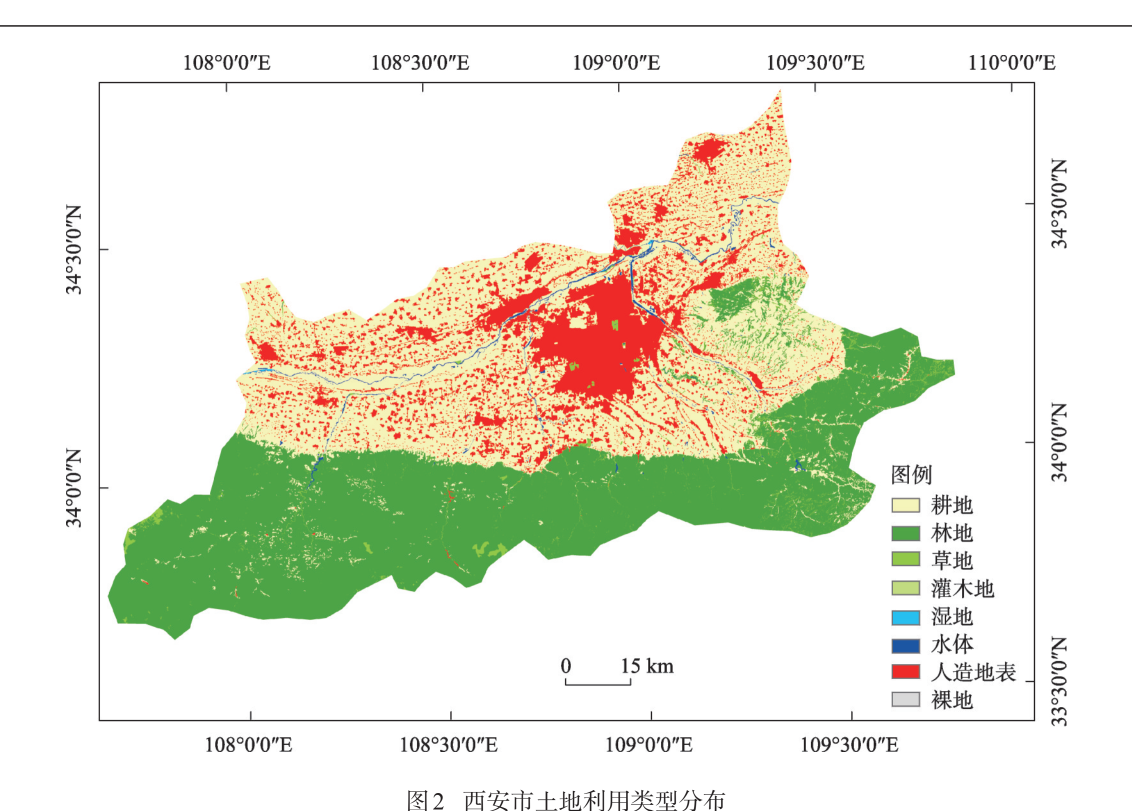


图2　西安市土地利用类型分布

Fig. 2　Distribution of land use types in Xi'an

chinaXiv:202209.00155v1

mL HF)，静置1 h后加盖，放入微波消解仪(CEM MARS6)消解，然后再将消解罐放入赶酸仪赶酸1 h之后，使用5%的硝酸溶液定容至50 mL，采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测量样品中的铬(Cr)、锰(Mn)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)和镉(Cd)；对于砷(As)的测定，同样称量0.3 g样品置于消解罐中，向其中加入8 mL王水(HNO_3:HCl＝1:3，V/V)，静置10 min后放入微波消解仪消解，使用标准溶液定容至50 mL，采用原子荧光光谱仪(AFS-9700)测定。在实验过程中设置空白样品、重复样品以及标准物质(GSS-1)以确保测量结果的准确性，回收率在80%~120%之间。

1.3　生态风险评价

1.3.1　潜在生态风险指数评价　潜在生态风险指数法(RI)考虑了多种重金属元素混合所造成的生态风险，是一种被广泛应用于评价沉积物生态风险的方法[28]。具体计算公式如下：

$$C_r^i = C_i / C_n^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \times C_r^i \quad (3)$$

式中：C_r^i为重金属i的污染系数；C_i为重金属i含量的实测值(mg·kg^{-1})；C_n^i为沉积物中重金属i的背景值；E_r^i为重金属i的单项潜在生态风险指数；T_r^i为重金属i的毒性响应参数，Cd、Mn、Ni、Cu、Zn和As分别取30、1、5、5、1和10[29]。RI为潜在生态风险指数，反映重金属的综合污染水平，E_r和RI的分级如表1所示。

表1　单项潜在生态风险指数(E_r)和潜在生态风险指数(RI)分级标准

Tab. 1　Single potential ecological risk index(E_r) and potential ecological risk index(RI)classificationcriteria

E_r	生态风险	RI	生态风险
E_r<40	低	RI<150	低
40≤E_r<80	轻度	150≤RI<300	轻度
80≤E_r<160	中度	300≤RI<600	中度
160≤E_r<320	高	RI≥600	高
E_r≥320	非常高	-	-

1.3.2　污染负荷指数法　污染负荷指数法(PLI)是利用沉积物中每种重金属对应的污染系数所计算得出的[30]，是一种用于评估沉积物中所有重金属的综合污染状况的方法[31]。金属污染系数(Contamination Factor of the Metals，CF)和PLI具体计算公式如下：

$$CF = C_i / B_i \quad (4)$$

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \cdots \times CF_n)^{1/n} \quad (5)$$

ChinaXiv合作期刊

式中：C_i为沉积物样品中重金属i的测量浓度；B_i为重金属i的地球化学背景浓度；n为重金属的数量。PLI≤1为无污染，1 < PLI≤2为轻度污染，2 < PLI≤3为中度污染，PLI > 3为强度污染[30]。

2 结果与分析

2.1 河流两岸土地利用类型面积占比

通过对比4条河流两岸100~1500 m缓冲区范围内土地利用类型的面积占比(图3a~图3e)可知，灞河、浐河上游多以耕地为主，中游多以人造地为主。2条河流不同的是灞河下游同上游一样以耕地为主，浐河下游则以人造地为主，且灞河、浐河两岸人造地比例总体呈现出随着缓冲区增大逐渐增大的趋势。灞河林地和草地主要集中在上游区域且所占面积比例相对较小，浐河1500 m缓冲区内基本上没有出现林地和草地。沣河和黑河研究区域多以耕地为主，说明灞河以及浐河两岸人类活动相对于沣河和黑河更为频繁以及复杂。

浐河河岸带人类活动强度指数最高(图3f)，尤其集中在浐河中下游。灞河中游部分河岸带人类活动强度较高，其余部分河岸带人类活动强度较轻；沣河下游河岸较中上游有明显突出的人类活动，而黑河整体表现良好。这一结果与土地利用类型分布相对应，反映了人类活动对土地利用的改变。

2.2 沉积物重金属浓度及其空间分布特征

由表2可知，西安市河流沉积物样品中Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd和As的平均浓度分别为45.53 mg·kg^{-1}、810.60 mg·kg^{-1}、33.07 mg·kg^{-1}、32.01 mg·kg^{-1}、88.33 mg·kg^{-1}、0.48 mg·kg^{-1}和6.31 mg·kg^{-1}，其中Mn、Ni、Cu、Zn和Cd均超出了陕西省的土壤背景值，分别是陕西省土壤背景值的1.46倍、1.15倍、1.24倍、1.21倍和4.65倍。Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd和As超出陕西省土壤背景值的点位分别占25%、87.5%、33.33%、66.7%、70.83%、45.83%和8.33%，其中Cd在54.16%的点位未检测出，检测出的点位主要分布在灞河的上游和下游以及浐河中下游。

灞河与浐河同为流经市区河流，灞河中Mn、Ni、Cu、Zn、Cd平均含量超出背景值，其中Cd的平均含量在4条河流中最高。浐河中Mn、Cu、Zn、Cd平均含量超出背景值，其中，Mn和Zn的平均含量是4条河流中最高的。灞河沉积物重金属含量总体低于浐河，这可能是因为浐河相较于灞河其位于城市区域河段所占比例以及河岸周边人类活动强度更大；浐河中下游与灞河中游位于城市区域，交通污染会

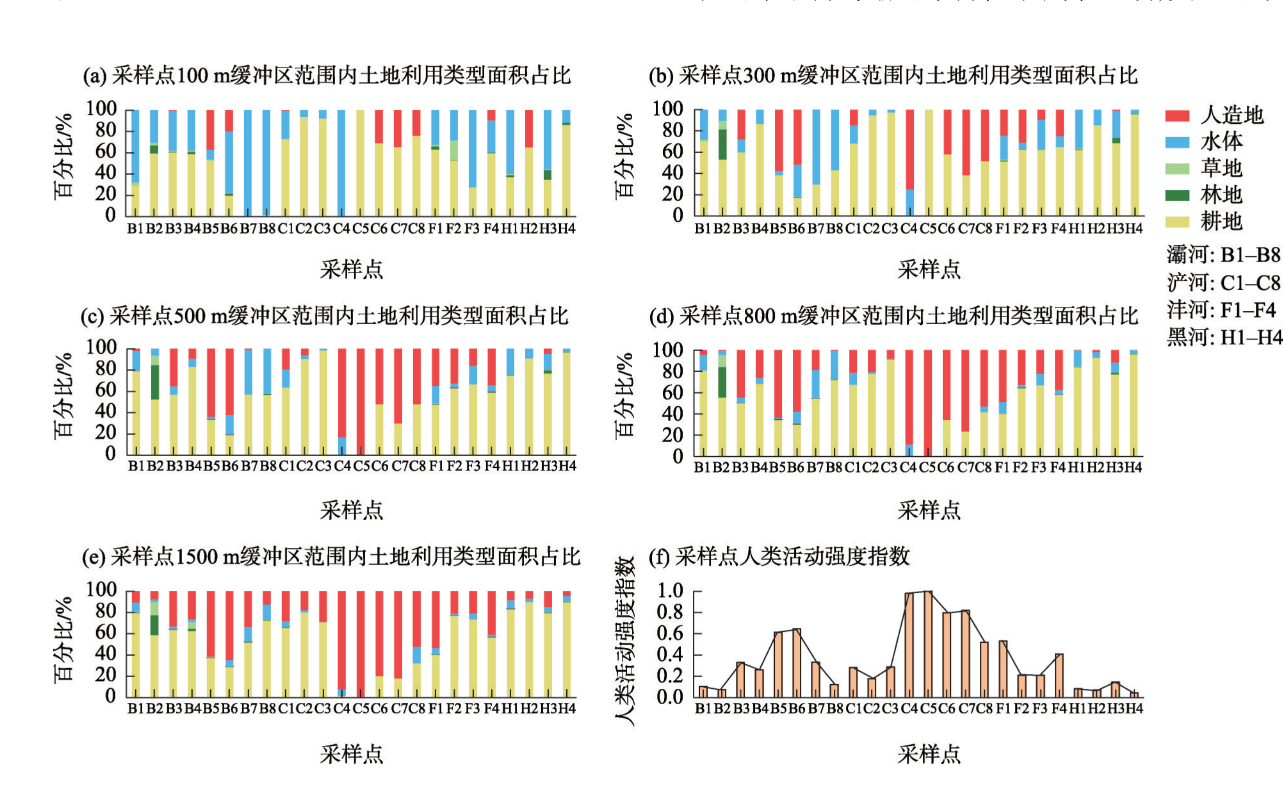


图3 土地利用类型面积占比和人类活动强度指数

Fig. 3 Proportion of land use types and intensity index of human activities

chinaXiv:202209.00155v1

表2 西安市河流沉积物重金属浓度

Tab. 2 Concentration of heavy metals in urban river sediments of Xi' an /(mg·kg⁻¹)

	样品数量		Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	As
西安市河流	24	平均	45.53	810.60	33.07	32.01	88.33	0.44	6.31
		C_v/%	75.81	42.53	71.56	56.53	39.84	140.75	53.25
灞河	8	平均	19.94	767.92	39.88	27.77	93.19	0.49	5.78
		C_v/%	105.25	39.89	84.53	30.76	26.70	144.98	46.63
浐河	8	平均	44.73	1007.71	28.02	34.38	102.69	0.44	6.73
		C_v/%	39.71	28.48	13.44	31.51	40.59	91.22	23.08
沣河	4	平均	49.25	601.46	20.33	25.00	79.71	0.46	4.88
		C_v/%	28.74	27.88	47.73	58.43	32.76	144.43	30.62
黑河	4	平均	94.58	710.92	42.29	42.75	58.54	0.42	7.97
		C_v/%	43.64	62.5	56.69	79.61	42.37	143.03	79.79
背景值			62.50	557.00	28.80	25.90	73.00	0.094	11.10

chinaXiv:202209.00155v1

产生Ni、Cu、Cd等重金属[18,32]。在该区域纺织加工以及机械设备制造等产业发达,会产生Mn、Cu、Zn、Cd等重金属[33-34]。此外,在灞河与浐河沿岸分布着多家污水处理厂,其处理之后的水会直接排入灞河与浐河,同样会增加重金属含量。

沣河与黑河远离城市,其沿岸主要以耕地为主,沣河中只有Cd平均含量超出背景值较多,其余重金属平均含量接近背景值。黑河中Cr、Mn、Ni、Cu、Cd平均含量超出背景值,且黑河中的Cr、Ni、Cu平均含量最高。在农业生产过程中需要使用大量的化肥与农药有关,其中含有Cr、Mn、Ni、Cd等重金属元素[35-37]。此外,秦岭矿产资源丰富,在矿石开采的过程中会产生Cu、As等重金属[38]。4条河流沉积物样品中As的平均含量均没有超过陕西省的土壤背景值,推测其主要来源于自然环境。整体来看,位于城市区域的浐河中下游重金属含量最高,而远离城市的沣河沉积物重金属含量最低,这与前文土地利用类型分布以及人类活动强度研究结果基本一致,反映了人类活动以及土地利用类型对重金属含量分布的影响。

一般认为当变异系数(C_v)小于15%时为弱变异,在15%~35%为中度变异,大于35%为高度变异[39]。变异系数越大表明重金属空间分布越不均匀,来源越复杂[40]。由表2可知,只有浐河中Ni处于弱变异,灞河中Cu、Zn,浐河中Mn、Cu、As以及沣河中Cr、Mn、Zn、As为中度变异,其余均为高度变异。

灞河B1、B7、B8样点,浐河C8样点以及黑河H4样点均位于河口区域,由图4可知,重金属中Cr、Mn、Ni、Zn、Cd均在河口区域表现出高浓度值,此外,重金属在沣河中游F2样点与黑河中游H1样点也表现出一定的高浓度值。李玄添等[41]在2015年研究发现,沉积物重金属高浓度值同样出现在支流入渭河口处;河口区域河流水文条件发生改变,可能造成重金属在此富集[42]。根据实地调查发现在沣河F2样点上游有现代农业产业园,在黑河H1样点上游则有化肥与农药生产公司以及包装厂,推测此处的重金属富集主要是由工农业活动共同导致的。

2.3 重金属与土地类型以及人类活动强度相关性分析

为进一步了解沉积物重金属与土地类型以及人类活动强度之间关系,对其进行斯皮尔曼相关性分析。由于浐河为灞河支流,2条河流地理位置相近且河流两岸土地利用类型与变化趋势总体相似,将灞河与浐河归为一类进行土地利用类型相关性分析。沣河与黑河两岸土地利用总体相似,将这2条河流归为一类与土地利用类型进行相关性分析。由表3可知,Zn、Cd与土地利用类型没有相关性,Cr、Mn在100~1500 m缓冲区范围内均与草地或林地面积呈显著负相关,Ni、As则在100~300 m缓冲区范围内与林地或草地面积呈现出负相关,而Cu只在100 m缓冲区范围内与林地面积呈现负相关。总体而言,Cr、Mn、Ni、As、Cu与草地、林地面积都有一定的负相关关系,且随着缓冲区范围的增大,相关性会逐渐减弱,表明河岸小范围内的植物对于重金属富集作用更强。Cr、Mn、Ni、Cu、Cd、As与河岸人

ChinaXiv合作期刊

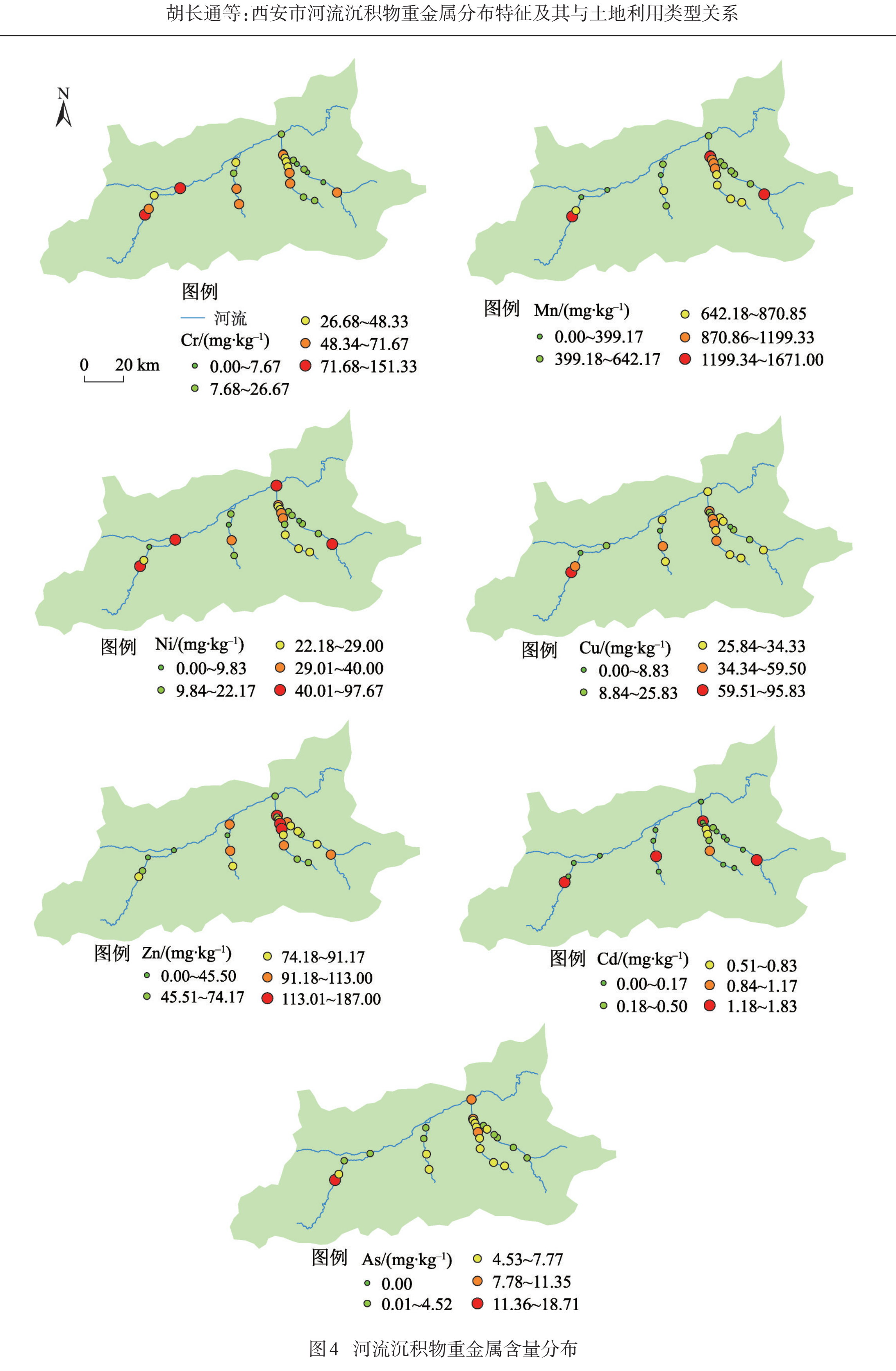


图4 河流沉积物重金属含量分布

Fig. 4 Distribution of heavy metals in river sediments

类活动强度指数均存在一定的正相关性,表明这几种元素的来源受人类活动影响较大。

虽然耕地与人造地在缓冲区所占比例较大,但是沉积物重金属与耕地和人造地并未呈现相关性。Miranda等[43]研究发现,Cd、Zn、Pb等重金属与自然用地以及人造地之间同样没有相关性,造成这

chinaXiv:202209.00155v1

chinaXiv:202209.00155v1

表3 灞河与浐河沉积物重金属与土地利用类型以及人类活动强度相关性

Tab. 3 Correlation between heavy metals in sediments of Ba River and Chan River and land type and intensity of human activities

范围	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	As
100 m	林地-0.69**	林地-0.55*	林地-0.68**	林地-0.50*	-	-	林地-0.66**
	-	-	-	-	-	-	草地-0.80**
300 m	林地-0.55*	草地-0.50*	林地-0.54*				林地-0.52*
	草地-0.55*	-	-	-	-	-	-
500 m	林地-0.54*	林地-0.62**	-	-	-	-	-
	草地-0.53*	草地-0.51*	-	-	-	-	-
800 m	林地-0.50*	林地-0.54*	-	-	-	-	-
1500 m	林地-0.51*	林地-0.51*	-	-	-	-	-
河岸带人类活动强度指数	0.72**	0.83**	0.72**	0.51*	-	0.62*	0.72**

注:仅列出了与重金属相关性显著的土地利用类型;*表示在0.05级别(双尾),相关性显著;**表示在0.01级别(双尾),相关性显著;-表示重金属与土地利用类型没有显著相关性。

种结果的原因可能是土地类型划分级别过大,在耕地与人造地区域人类活动更为复杂,土地利用形式多样化。因此,对于沉积物重金属与河岸带附近的耕地、人造地之间的相关性研究需要基于更具体划分的土地利用类型进行深入探讨[44]。由于沣河和黑河两岸土地利用类型较为单一以及样本数量较少,重金属与土地类型以及人类活动强度相关性并不显著。

2.4 重金属污染风险评估

2.4.1 潜在生态风险指数评价 由表4可知,7种重金属在灞河中造成的生态风险程度依次为:Cd>Ni>Cu>As>Zn>Mn>Cr;在浐河中依次为:Cd>Cu>As>Ni>Mn>Cr>Zn;在沣河中依次为:Cd>Cu>As>Ni>Cr>Zn>Mn;在黑河中依次为:Cd>Cu>Ni>As>Cr>Mn>Zn。由4条河流中重金属的E_r均值可知,Cd在整个研究区域以及4条河流中均处于中度潜在生态风险;Cd对于污染贡献率最高,这是因为Cd的毒性系数较大导致的;其他重金属造成的潜在生态风险较低。根据4条河流RI的平均值可知,4条河流均处于中等程度的潜在生态风险。

对4条河流的进一步分析(图5)可知,处于轻度潜在生态风险和中度潜在生态风险的样点各占16.67%,处于高度潜在生态风险样点占4.17%。其中,处于轻度生态风险的样点为灞河B6样点以及浐河C4、C5、C6样点,处于中度生态风险的样点为灞河的B1、B7样点,浐河C3样点以及黑河H1样点,处于高度潜在生态风险为黑河H1样点。

2.4.2 污染负荷指数评价 由图6可知,灞河、浐河、沣河、黑河站点的PLI值范围分别为0.44~1.92,0.81~1.86,0.34~1.75,0.48~2.80。灞河中上游辋峪河入灞河口处(B1)与下游浐河入灞河口处(B7)受到轻度污染,且PLI值由上游至下游逐渐增大,这可能是重金属在河口处富集从而导致沉积物污染。位于城市区域的浐河中下游(C3~C7)受到了轻度污染,且PLI值由上游至下游呈现先增大后减小的趋势,是由于城市区域人口密集,交通与工业生产排放大量污染物导致河流沉积物污染;另外,灞河与浐河的PLI值变化趋势与河岸带人类活动强度指数变化趋势基本一致,说明河岸带人类活动强度对于河流沉积物有一定的影响。沣河中游(F2)受到轻

表4 河流沉积物重金属单项潜在生态风险指数(E_r)和潜在生态风险指数(RI)均值

Tab. 4 Mean values of single potential ecological risk index(E_r) and potential ecological risk index(RI) of heavy metals in river sediments

河流	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	As	RI
灞河	0.64	1.38	6.92	5.36	1.28	139.63	5.20	160.41
浐河	1.43	1.81	4.86	6.64	1.41	139.63	6.07	161.84
沣河	1.58	1.08	3.53	4.83	1.09	146.28	4.40	162.78
黑河	3.03	1.28	7.34	8.25	0.80	132.98	7.18	160.86

ChinaXiv合作期刊

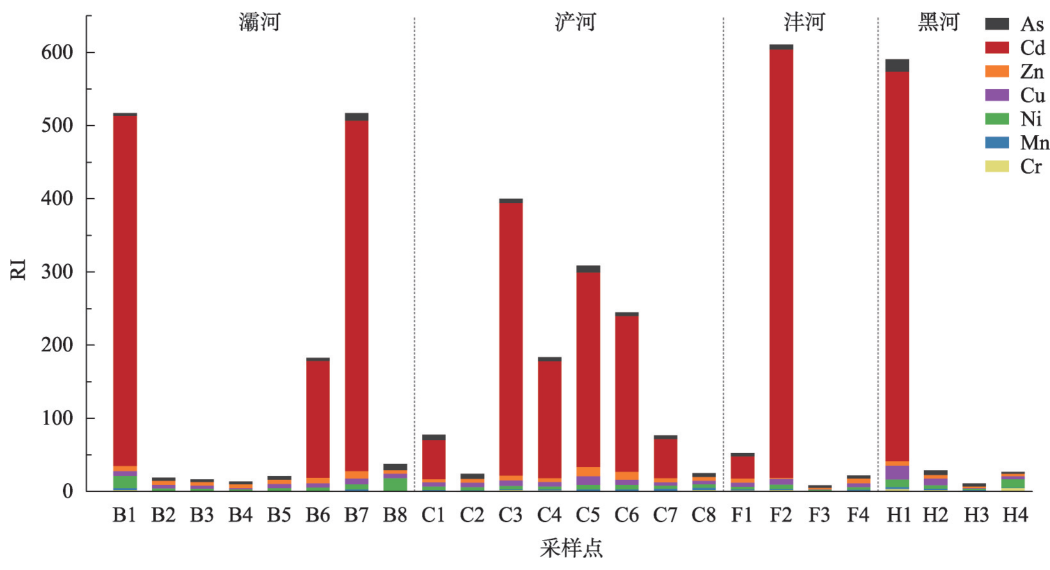


图5 沉积物重金属潜在生态风险指数(RI)

Fig. 5 Potential ecological risk index(RI) of heavy metals in sediments

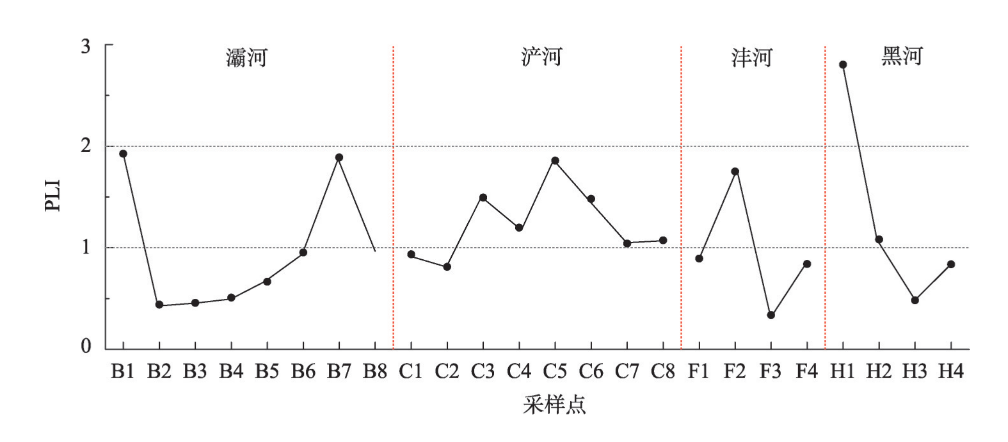


图6 污染负荷指数(PLI)

Fig. 6 Pollution load index(PLI)

度污染,黑河中游(H1)受到中度污染,为所有样点中受污染程度最高。沣河与黑河样点的PLI值变化趋势与河岸带人类活动强度变化趋势并不相似,这可能是因为受农业活动以及工业生产等其他形式的人类活动影响更大。所有样点中受到污染的样点占比45.83%,浐河受到污染的样点占比最大。

污染负荷指数法评价结果相对于潜在生态风险指数法评价结果来说受污染样点相似,但是所受污染程度有所不同,这是因为2种方法所评价的侧重点有所不同。2种方法均显示远离城市的沣河中游与黑河中游受到污染,其周围工业与农业生产行为可能是造成污染的主要原因。2种方法同样表明流经西安市区的浐河所受污染范围最大,且主要集中在人造地占比与人类活动强度指数较高的中下游,因此,政府应对浐河中下游河岸带加强保护。灞河所受污染范围次之,远离城市的沣河与黑河虽然有个别样点受到污染,也是由于复杂的人类活动所造成的,在人类活动较小的样点基本没有受到污染。

2.5 重金属来源分析

相关性分析与主成分分析可以用来确定重金属的潜在来源,金属之间的相关性系数如果很高,表明它们可能具有相同的来源[45-46]。斯皮尔曼相关性分析表明(图7),Cr只与Ni显著相关,Mn、Ni、Cu、Cd、As之间显著相关,Zn与Cu显著相关。表明Cr与Ni可能部分来源相同,Mn、Ni、Cu、Zn、Cd、As部分来源相同。

在进行PCA分析前,进行Kaiser-Meyer-Olkin

chinaXiv:202209.00155v1

chinaXiv:202209.00155v1

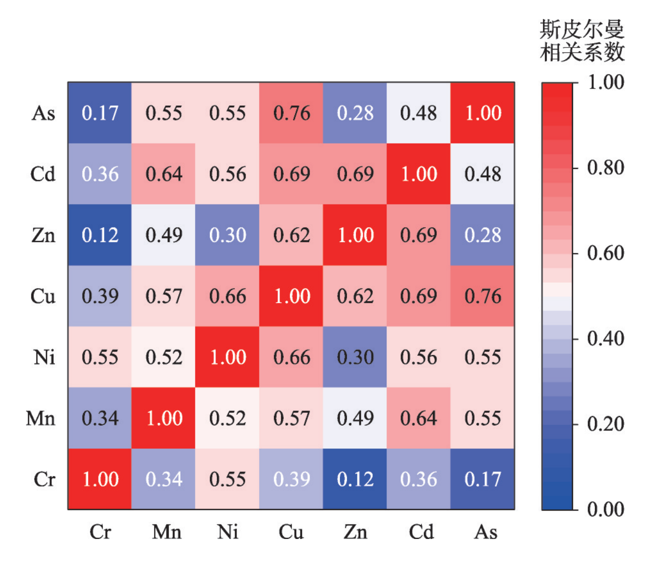


图7　重金属相关性分析热图

Fig. 7　Heat map of heavy metal correlation analysis

(KMO)和巴特利特球形度检验。KMO值为0.69，高于0.5(KMO推荐值)，且通过了巴特利特球形度检验(P<0.001)[47]。基于特征值>1，一共提取了2个主成分，这2个主成分累计解释了67.84%的总方差。第一主成分(PC1)方差贡献率为50.54%，第二主成分(PC2)方差贡献率为17.30%。载荷图结果(图8)表明，Mn、Ni、Cu、Cd、As对于主成分一具有较强的正解释，而Cr、Zn对于主成分二具有较强的正解释；对于PC1中的重金属，相互之间具有显著的相关性。Mn、Cd通常与电池生产有关[12]，Ni、Cd、Cu则通常来自于电镀、冶金等工业排放废水以及交通污染[21,48]；这可能与西安市装备制造，有色金属的加工

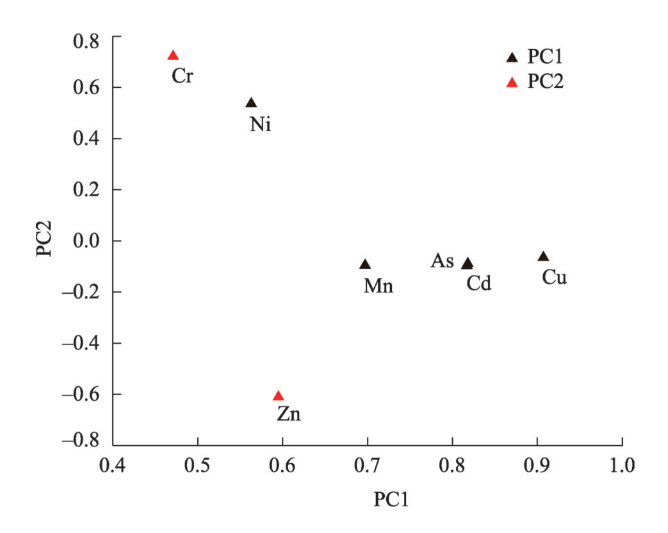


图8　沉积物重金属主成分载荷图

Fig. 8　Principal component loading diagram of heavy metals in sediments

产业发展有关[49]。相关研究表明，As受金矿开采的影响，可能来源于秦岭北麓的矿石开采[50]。因此主成分一主要是受工业活动、交通以及自然背景的联合影响。

Cr与Zn同为主成分二，但是相关性并不显著，这说明2种重金属污染来源不同；Cr在黑河沉积物中的含量最高，黑河周边是以农业用地为主的环境，根据以往的研究Cr可能主要来自于农业活动[51]。而Cr与Ni具有很强的相关性，所以，Cr来源于农业生产与工业活动。Zn与Cu、Cd之间具有很强的相关性，根据以往研究Zn与机械制造，纺织加工有关[52]。所以，主成分二主要来源于农业生产与工业生产。

3　结 论

(1) 西安城市河流沉积物中Mn、Ni、Cu、Zn、Cd的平均浓度超出了陕西省的土壤背景值，其中，Cd受人类活动影响最大。整体来看，远离城市的沣河沉积物重金属浓度最低。4条河流中人造地占比与人类活动强度较大的浐河中下游区域以及河口区域、沣河中游、黑河中游重金属含量最高。相关性分析表明，河岸小范围内林地、草地等自然用地对于沉积物重金属富集作用更强。

(2) RI评价结果表明，Cd对环境造成的风险最大，4条河流均处于中等潜在生态风险；RI与PLI评价表明，浐河所受到污染样点最多，且多处于城市区域的浐河中下游；沣河中游F2样点与黑河中游H1样点受到污染程度最大；为防止污染进一步加深，应特别注意Cd污染的防治，特别是黑河中游与沣河中游。

(3) 相关性分析与主成分分析表明，Mn、Zn、Cu、As、Cd主要受工业活动、交通排放以及自然环境联合影响，Cr和Zn主要来自于农业活动与工业生产。

参考文献(References)：

[1]　Fan S. Assessment of heavy metal pollution in stream sediments for the Baoji City section of the Weihe River in Northwest China [J]. Water Science and Technology, 2014, 70(7): 1279–1284.

[2]　王若锦, 邵天杰, 卫佩茹. 环青海湖地区表层土壤重金属富集含量及其生态风险评价[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 411–420. [Wang Ruojin, Shao Tianjie, Wei Peiru. Enrichment content and

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202209.00155v1

ecological risk assessment of heavy metal in surface soil around Qinghai Lake[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 411–420.]

[3] Ustaoğ lu F, Islam M S. Potential toxic elements in sediment of some rivers at Giresun, Northeast Turkey: A preliminary assessment for ecotoxicological status and health risk[J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106237.

[4] Xiao H, Shahab A, Xi B, et al. Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China[J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116189.

[5] 任惠丽, 田强兵, 丁妍, 等. 渭河陕西段鱼体肌肉中重金属污染研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(12): 134–137. [Ren Huili, Tian Qiangbing, Ding Yan, et al. Analysis of heavy metal contained in fishes' muscle in Shaanxi section of Weihe River[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(12): 134–137.]

[6] Bing H, Wu Y, Liu E, et al. Assessment of heavy metal enrichment and its human impact in lacustrine sediments from four lakes in the mid-low reaches of the Yangtze River, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(7): 1300–1309.

[7] Liu B Q, Xu M, Wang J, et al. Ecological risk assessment and heavy metal contamination in the surface sediments of Haizhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 163: 111954.

[8] Yang J, Cao L L, Wang J H, et al. Speciation of metals and assessment of contamination in surface sediments from Daya bay, south China sea[J]. Sustainability, 2014, 6(12): 9096–9113.

[9] Li R, Tang X Q, Guo W J, et al. Spatiotemporal distribution dynamics of heavy metals in water, sediment, and zoobenthos in mainstream sections of the middle and lower Changjiang River[J]. Science of the Total Environment, 2020, 714(1): 136779.

[10] Mrozinska N, Bakowska M. Effects of heavy metals in lake water and sediments on bottom invertebrates inhabiting the brackish coastal lake Lebsko on the southern Baltic coast[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (18): 6848.

[11] Fan H M, Chen S S, Li Z E, et al. Assessment of heavy metals in water, sediment and shellfish organisms in typical areas of the Yangtze River Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 151: 110864.

[12] Liu X P, Jiang J Y, Yan Y, et al. Distribution and risk assessment of metals in water, sediments, and wild fish from Jinjiang River in Chengdu, China[J]. Chemosphere, 2018, 196: 45–52.

[13] Tang W Z, Sun L, Shu L M, et al. Evaluating heavy metal contamination of riverine sediment cores in different land-use areas[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2020, 14(6): 141–151.

[14] Mohammadi M, Khaledi Darvishan A, Dinelli E, et al. How does land use configuration influence on sediment heavy metal pollution? Comparison between riparian zone and sub-watersheds[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35: 1–16.

[15] Nsenga Kumwimba M, Zhu B, Wang T, et al. Distribution and risk assessment of metals and arsenic contamination in man-made ditch sediments with different land use types[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(24): 24808–24823.

[16] Wang F, Dong W Y, Zhao Z L, et al. Spatial and vertical distribution, composition profiles, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon residues in the sediments of an urban tributary: A case study of the Songgang River, Shenzhen, China[J]. Environmental Pollution, 2020, 266: 115360.

[17] Wang L, Zhang J, Li H L, et al. Shift in the microbial community composition of surface water and sediment along an urban river[J]. Science of The Total Environment, 2018, 627: 600–612.

[18] 王洪涛, 张俊华, 丁少峰, 等. 开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4520–4530. [Wang Hongtao, Zhang Junhua, Ding Shaofeng, et al. Distribution characteristics, sources identification and risk assessment of heavy metals in surface sediments of urban rivers in Kaifeng[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(12): 4520–4530.]

[19] Zeng Y S, Bi C J, Jia J P, et al. Impact of intensive land use on heavy metal concentrations and ecological risks in an urbanized river network of Shanghai[J]. Ecological Indicators, 2020, 116: 106501.

[20] Viana L F, Kummrow F, Cardoso CAL, et al. High concentrations of metals in the waters from Araguari River lower section (Amazon biome): Relationship with land use and cover, ecotoxicological effects and risks to aquatic biota[J]. Chemosphere, 2021, 285: 131451.

[21] Wang F, Dong W Y, Zhao Z L, et al. Heavy metal pollution in urban river sediment of different urban functional areas and its influence on microbial community structure[J]. Science of The Total Environment, 2021, 778: 146383.

[22] 孙定, 董兴国, 景红军, 等. 西安新型都市渔业发展思路探讨[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(13): 101–103. [Sun Ding, Dong Xingguo, Jing Hongjun, et al. Discusion on the development ideas of the new-type urban modern fishery in Xi'an city[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(13): 101–103]

[23] 蒋建军, 冯普林. 秦岭北麓水资源利用现状与生态景观维护[J]. 人民黄河, 2010, 32(7): 68–70. [Jiang Jianjun, Feng Pulin. Present status of water resources utilization and maintenance of ecological landscape of the northern foot of Qinling Mountain[J]. Yellow River, 2010, 32(7): 68–70.]

[24] 郭威, 李祥忠, 刘卫国. 西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1291–1297. [Guo Wei, Li Xiangzhong, Liu Weiguo. Study on the content and carbon isotopic composition of water dissolved inorganic carbon from rivers around Xi'an City[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1291–1297.]

[25] 孙大鹏. 西安市周边河流水质变化趋势的分析研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(1): 76–78. [Sun Dapeng. Analysis of

chinaXiv:202209.00155v1

changing trend of the water quality around Xi'an[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007, 18(1): 76–78.]

[26] Wan X H, Yang T, Zhang Q, et al. A novel comprehensive model of set pair analysis with extenics for river health evaluation and prediction of semi-arid basin: A case study of Wei River Basin, China[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 775: 145845.

[27] Wan X H, Yang T, Zhang Q, et al. Joint effects of habitat indexes and physic-chemical factors for freshwater basin of semi-arid area on plankton integrity: A case study of the Wei River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106909.

[28] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14: 975–1001.

[29] Hilton J, Davison W, Ochsenbein U. A mathematical model for analysis of sediment core data: Implications for enrichment factor calculations and trace-metal transport mechanisms[J]. Chemical Geology, 1985, 48: 281–291.

[30] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgoländer Meeresuntersuchungen, 1980, 33 (1–4): 566–575.

[31] Liu J, Peng A G, Deng S, et al. Distribution of heavy metals and radionuclides in the sediments and their environmental impacts in Nansha Sea area, South China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 166: 112192.

[32] 王勤, 彭渤, 方小红, 等. 湘江长沙段沉积物重金属污染特征及其评价[J]. 环境化学, 2020, 39(4): 999–1011. [Wang Qin, Peng Bo, Fang Xiaohong, et al. Characteristics and assessment of heavy metal contamination in sediments from Changsha section of the Xiangjiang River, Hunan Province of China[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(4): 999–1011.]

[33] 马玉, 李团结, 高全洲, 等. 珠江口沉积物重金属背景值及其污染研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 712–719. [Ma Yu, Li Tuanjie, Gao Quanzhou, et al. Background values and contamination of heavy metals in sediments from the Pearl River Estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(3): 712–719.]

[34] 李欢娟, 李会霞, 史兴民. 西安市主要湖泊表层沉积物重金属污染及生态风险评估[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 122–126. [Li Huanjuan, Li Huixia, Shi Xingmin. Pollution characteristics of heavy metals and ecological risk assessment for thesurface sediments of the lakes in Xi'an[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(2): 122–126.]

[35] 徐双贵, 杨莎, 秦西伟, 等. 湟水河流域西宁段河流表层沉积物重金属空间分布及生态风险评估[J]. 地球与环境, 2021, 49(5): 561–569. [Xu Shuanggui, Yang Sha, Qin Xiwei, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from Xining section of the Huangshui River Basin[J]. Earth and Environment, 2021, 49(5): 561–569.]

[36] 温泉, 赵艳民, 曹伟, 等. 潮白河中游沉积物中重金属分布、来源及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2020, 33(3): 599–607. [Wen Quan, Zhao Yanmin, Cao Wei, et al. Distribution characteristics, source and potential ecological risk of heavy metals pollution in the middle reaches of Chaobai River[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(3): 599–607.]

[37] 宁增平, 蓝小龙, 黄正玉, 等. 贺江水系沉积物重金属空间分布特征、来源及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3036–3047. [Ning Zengping, Lan Xiaolong, Huang Zhengyu, et al. Spatial distribution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in sediments of the Hejiang River[J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3036–3047.]

[38] 杨安, 邢文聪, 王小霞, 等. 西藏中部河流、湖泊表层沉积物及其周边土壤重金属来源解析及风险评价[J].中国环境科学, 2020, 40(10): 4557–4567. [Yang An, Xing Wencong, Wang Xiaoxia, et al. Source and risk assessment of heavy metals in surface sediments of rivers, lakes and their surrounding soils in central Tibet [J]. China Environmental Science, 2020, 40(10): 4557–4567.]

[39] 孙恬, 王延华, 叶春, 等. 太湖北部小流域沉积物重金属污染特征与评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2196–2203. [Sun Tian, Wang Yanhua, Ye Chun, et al. Characteristics and assessment of heavy metals pollution in the sediments from a small catchment in northern Taihu Basin[J]. China Environmental Science, 2020, 40 (5): 2196–2203.]

[40] Li M Y, Zhang Q G, Sun X J, et al. Heavy metals in surface sediments in the trans-Himalayan Koshi River catchment: Distribution, source identification and pollution assessment[J]. Chemosphere, 2020, 244: 125410.

[41] 李玄添, 张风宝, 杨明义. 渭河陕西段沉积物重金属空间分布及来源解析[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4225–4234. [Li Xuantian, Zhang Fengbao.Yang Mingyi. Spatial variation and source identification of heavy metals in sediments in Shaanxi section of Weihe River, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4225–4234.]

[42] 李晋鹏, 成登苗, 赵爱东, 等. 澜沧江梯级水坝库区沉积物重金属和营养盐污染特征及评价[J]. 环境科学学报, 2019, 39(8): 2791–2799. [Li Jinpeng, Cheng Dengmiao, Zhao Aidong, et al. The characteristics and the assessment of heavy metal and nutrient pollution in sediments of cascading hydropower dams in Lancang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(8): 2791–2799.]

[43] Miranda L, Deilami K, Ayoko G, et al. Influence of land use class and configuration on water-sediment partitioning of heavy metals [J]. Science of The Total Environment, 2021, 804: 150116.

[44] Liu A, Duodu G O, Goonetilleke A, et al. Influence of land use configurations on river sediment pollution[J]. Environmental Pollution, 2017, 229: 639–646.

[45] Yang T, Chen J, Li X P, et al. Ecological risk by heavy metal contents in sediments within the Wei River Basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(3) : 1–12.

ChinaXiv合作期刊

[46] Tian K, Wu Q M, Liu P, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments and water from the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. Environment International, 2020, 136: 105512.

[47] Fu J, Zhao C P, Luo Y P, et al. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: Their relations to environmental factors [J]. Journal of Hazard Mater, 2014, 270: 102–109.

[48] 杨颖, 孙文, 刘吉宝, 等. 北运河流域沙河水库沉积物重金属分布及生态风险评估[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 217–227. [Yang Ying, Sun Wen, Liu Jibao, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Shahe reservoir in northern Canal Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41 (1): 217–227.]

[49] 杨阳, 周正朝, 张福平, 等. 沣河沿岸土壤重金属分布特征及来源分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(2): 237–243. [Yang Yang, Zhou Zhengchao, Zhang Fuping, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals in soil samples collected from the riparian area of the Fenghe River[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(2): 237–243.]

[50] 张義, 于一雷, 李胜男, 等. 潮河沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 169–179. [Zhang Yi, Yu Yilei, Li Shengnan, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal in sediments of Chao River, North China[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(7): 169–179.]

[51] Yang T, Li X P, Xu Y F, et al. Potentinal ecological risk and contamination of heavy metals in Feng River, China[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2017, 26(6): 4039–4046.

[52] 孙芹芹, 姬厚德, 赵东波, 等. 闽江下游土地利用格局对河流沉积物中重金属含量的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2020(3): 113–119. [Sun Qinqin, Ji Houde, Zhao Dongbo, et al. The impact of land use patterns on heavy metals contents in sediments of the Minjiang lower reaches[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(3): 113–119.]

Distribution characteristics of heavy metals in river sediments and their relationship with land use types in Xi'an City

HU Changtong [1], YANG Tao [1,2], WAN Xuhao [1], SUN Laikang [1], ZHENG Yiwen [1], YAN Xuerong [1]

(1. School of Geography and Tourism of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
2. International Joint Research Centre of Shaanxi Province for Pollutant Exposure and Eco-Environmental Health, Xi'an 710062, Shaanxi, China)

Abstract: Typical urban rivers in Xi'an (Ba River, Chan River, Feng River, and Hei River) were selected as the research object to understand the impact of different land-use types on the distribution of heavy metals in river sediments. The spatial distribution, environmental risks, and sources of heavy metals (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, and As) in river sediments were analyzed and evaluated using potential ecological risk (RI), pollution load index (PLI), correlation analysis, and principal component analysis. Results showed that the content of heavy metals in the sediments of the four rivers was presented in the following order: Chan River > Ba River > Hei River > Feng River. The RI results showed that Cd remarkably contributed to the pollution, and the four rivers were all at moderate potential ecological risk. The PLI results showed that the H1 sample site in Hei River was moderately polluted, which was the highest. The RI and PLI results showed that the sample sites in the Chan River were the most polluted, and they were concentrated in the middle and lower reaches where the proportion of artificial ground and intensity of human activities were high. In addition, the results of correlation analysis and principal component analysis showed that most heavy metals came from human activities such as emissions from industrial and agricultural production and traffic pollution. Therefore, attention should be paid to the prevention and control of Cd pollution, particularly in the middle reaches of Feng River and Hei River, to prevent further pollution.

Keywords: urban rivers; heavy metals in sediments; spatial distribution; land use types; ecological risks

chinaXiv:202209.00155v1